ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد مخلوط آسفالت گرم ساخته شده با کائولن به عنوان فیلر با دانه‌بندی سنگدانه‌های سوپرپیو

مقاله علمی – پژوهشی

سارا چوبدار*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sara_choubdar@civileng.iust.ac.ir
دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵
صفحه ۳۷۸-۳۶۵

چکیده

فیلر های معدنی و دانه بندی‌های مختلف سنگدانه‌ها تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی روسازی‌های آسفالتی دارند. در این تحقیق تأثیر مواد غیر متعارف به نام کائولن و دانه‌بندی سوپرپیو بر خواص مارشال، حساسیت به رطوبت و تغییر شکل دائمی در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی کائولن نشان می‌دهد که میزان کل دی اکسید سیلیکون (SiO2)، اکسید آهن (Fe2O3) و اکسید آلومینیوم (Al2O3) به ترتیب ۶۳، ۲۴,۱ و ۲,۸۴ درصد بوده است. خواص فیزیکی کائولن بر روی وزن مخصوص انجام شد و شاخص پلاستیک به ترتیب ۲,۶۲ و ۳,۲۴ بود. بر اساس مشخصات منطقه مورد مطالعه و دما، عیار قیر با نفوذ ۷۰/۶۰ انتخاب می شود. نمونه های مخلوط داغ آسفالت[1] (HMA) از سه دانه بندی مختلف سوپرپیو با پودر معمولی سنگ خرد شده فیلر (CSD)[2] با نسبت های مختلف (۵,۰، ۶,۰ و ۷,۰٪) و پنج محتوای مختلف قیر (۴، ۴,۵، ۵، ۵,۵ و ۶) تهیه شد. ٪ آسفالت مخلوط گرم با ۵,۰٪ CSD به عنوان مخلوط کنترل انتخاب شد. فیلر معمولی با کائولن با نرخ‌های جایگزینی متفاوت (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪) بر اساس مخلوط کنترل با ۵٪ CSD و ۵,۱٪ محتوای قیر بهینه (OBC)[3] جایگزین شد. نرخ جایگزینی ۳۰ درصد کائولن خواص مارشال و مقاومت بهتری در برابر حساسیت به رطوبت ایجاد می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از کائولن بر روی HMA معیارهای تعیین‌شده در مشخصات را به‌عنوان فیلر با دانه‌بندی سوپرپیو تا ۳۰ درصد جایگزینی فیلر معمولی در HMA برآورده کرده است.

واژه‌های کلیدی: کائولن، فیلر، حساسیت رطوبتی، عملکرد، سوپرپیو، قیر اصلاح شده

۱-مقدمه

امروزه به دلیل توسعه صنایع معدنی و افزایش استفاده از مواد معدنی، دارایی‌های طبیعی به طور چشمگیری کاهش یافته است. به منظور صرفه جویی در حدس و گمان هزینه و افزایش طول عمر روسازی آسفالتی، استفاده از مخلوط آسفالت اصلاح شده می‌تواند نیازهای کاربران را برآورده کند. برای حفاظت از منابع طبیعی، تعدادی از مطالعات برای نشان دادن سهولت استفاده از مواد رایج و انتخابی متنوع در روسازی‌های بتن و آسفالت مانند آهک، سیمان، سرباره فولادی، لاستیک زباله، پلی اتیلن زباله، بتن بازیافتی و آسفالت انجام شده است. سنگدانه، و همچنین ضایعات ساختمانی و تخریب کیفیت سطح روسازی است (Pourtahmasb et al, 2014; Lee et al, 2012). تحت تأثیر محتوا و نوع مواد تشکیل دهنده مورد استفاده برای تهیه مخلوط آسفالتی عملکرد آسفالت مخلوط گرم اساساً تابعی از ویژگی‌های اجزای آن است: قیر، فیلر و سنگدانه. پرکننده‌ها موادی از انواع مختلف هستند، اکثر آنها از الک ۰,۰۷۵ میلی متر عبور می‌کنند و ادغام آنها در چسب‌های

قیری و غیر قیر و در مخلوط‌های سنگدانه ویژگی‌های خاصی را به این مخلوط‌ها می‌بخشد. پرکننده‌ها از نظر ترکیب مخلوط‌ها و خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها نقش عمده‌ای در تهیه آسفالت دارند. درصد بالاتری از فیلر بسیار ریز ممکن است مخلوط را بیش از حد سفت کند و کار با آن را مشکل کند و منجر به ایجاد یک مخلوط حساس به ترک شود. پرکننده‌ها بر کارایی، حساسیت به رطوبت، سفتی و ویژگی‌های پیری آسفالت مخلوط گرم تأثیر می‌گذارند. به منظور بهبود عملکرد و دوام روسازی، تولید یک مخلوط خوب حیاتی است (Guha et al, 2020; Brown et al, 2012). بنابراین، درک تأثیر فیلرها بر مخلوط بتن آسفالتی اساسی است. استفاده از مواد در دسترس محلی در ساخت و ساز جاده بخش کلیدی ساخت و ساز راه است. یکی از امیدوارکننده‌ترین مواد فیلر در HMA از نظر فیلرهای غیر متعارف موجود و معرفی شده محلی، کائولن است. کائولن می‌تواند زیرگروهی از کانی‌های رسی باشد که دارای پلی‌تیپ‌هایی برای کائولینیت، دیکیت و ناکریت و چند شکلی به نام هالویزیت است. معمولاً به عنوان خاک رس سفید و ظریف متمایز می‌شود که تطبیق پذیری را با ترکیب ذرات صفحه مانند دانه نشان می‌دهد. از تغییر سیلیکات‌های آلومینات بی‌آب در سنگ‌های غنی فلدسپات مانند سنگ از طریق هوازدگی یا اشکال آبی تولید می‌شود. چنین تصویری استنباط می‌کند که کائولن برای استفاده به عنوان یک پوزولان طبیعی مناسب است. رویدادهای کائولن در اکثر موارد در تمام خشکی‌های جهان به جز قطب جنوب مشترک و با جزئیات است. ایالات متحده آمریکا رتبه‌بندی‌ترین کشور با ذخایر کائولن است. ژاپن، آلمان، بلژیک–لوکزامبورگ، فنلاند، چین و ایتالیا به ترتیب بزرگترین تولیدکنندگان کائولن هستند (Singh et al, 2016; Mampearachchi et al, 2012). بزرگترین تولیدکنندگان در سایر مناطق جهان عبارتند از: کانادا برای آمریکای شمالی، مصر برای آفریقا، آرژانتین برای آمریکای جنوبی و استرالیا برای اقیانوسیه در کشورهای مختلف آفریقایی، ذخایر فراوانی از کائولن وجود دارد. بیشترین ذخایر و رخدادهای کائولن در جنوب و غرب آفریقا و کمترین تعداد مربوط به شمال آفریقا بود. در شرق آفریقا، اریتره، اتیوپی، کنیا و اوگاندا، هر کدام حداقل ۸ انبار و رویداد کائولن داشتند. آثار توپوگرافی از گذشته وجود کائولن را در قلمروهای متعددی در داخل اتیوپی نشان داد. در مخلوط HMA، دانه بندی به عنوان ویژگی سنگدانه در نظر گرفته می شود که به دلیل تأثیر آن بر خواص مخلوط و عملکرد مخلوط‌های HMA از جمله فضای خالی هوا، پایداری، سفتی، دوام، نفوذپذیری، کارپذیری، مقاومت در برابر خستگی، اصطکاک نیاز به توجه دقیق دارد. مقاومت و مقاومت در برابر آسیب رطوبت روش‌های مختلف طراحی روسازی آسفالتی برای افزایش عملکرد جاده‌ها معرفی می‌شوند (Bedassa et al, 2019; Kim et al, 2018). مخلوط Superpave یک سیستم دانه بندی متفاوت از طرح مخلوط مارشال را معرفی می کند. دانه بندی سنگدانه‌های فوق هموار با معرفی منطقه محدود به دانه‌بندی سنگدانه‌ها مشخص می‌شود. از آنجایی که مطالعه بر روی ارزیابی اثرات دانه بندی سنگدانه‌های Superpave بر پارامترهای طراحی روش مارشال دوره پوشیدن انجام شد، دانه بندی مشخص شده Superpave می‌تواند به عنوان راهنمای انتخاب دانه بندی سنگدانه برای دوره پوشیدن در طراحی مخلوط مارشال بدون اثر معنی‌دار استفاده شود. (Mampearachchi et al, 2012; Mohd Satar et al, 2017). یکی از خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی قبل از عمر مفید آنها به دلیل کیفیت مصالح ساختمانی و نقص در طراحی مخلوط می‌باشد. از این میان کیفیت مصالح فیلر در خرابی روسازی‌ها تاثیر بسزایی دارد. یکی از دلایل این مشکل انتخاب نوع و محتوای مواد فیلر ضعیف برای مخلوط بتن آسفالت گرم است. فیلرهای معدنی دلایل اصلی افزایش سفتی مخلوط ملات آسفالت گرم و بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی هستند. نوع پرکننده و محتوای آن تأثیر قابل توجهی بر مخلوط قیری دارد و باعث می‌شود که آن را به همان اندازه سفت‌تر عمل کند و در نتیجه بر عملکرد روسازی HMA از جمله رفتار شکست آن تأثیر بگذارد (Khasawneh et al, 2020). پس از آن، استفاده از مواد فیلر جدید باید برای کاهش وجود خواص و عملکرد ضعیف مارشال در مخلوط بتن آسفالتی مورد بررسی قرار گیرد. ساخت روسازی قوی، بادوام، مقاوم در برابر خستگی و تغییر شکل دائمی، سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه بودن روسازی را می‌توان از طریق استفاده از مواد فیلر جدید در دانه بندی سنگدانه‌ها به دست آورد. از این رو، طراحی خوب مخلوط های قیری باید در آزمایشگاه‌ها برای ارائه یک سازه روسازی قوی که تقاضای حمل و نقل مورد بحث مردم را برآورده کند، مورد مطالعه قرار گیرد. این کار را می‌توان با

استفاده از مواد طبیعی یافت شده مانند کائولن به عنوان ماده فیلر در دانه بندی اختلاط سنگدانه‌های آسفالت گرم انجام داد. توزیع اندازه ذرات، یا دانه بندی سنگدانه‌ها، مهم‌ترین رقمی است که بر عملکرد کامل مصالح روسازی آسفالت تأثیر می‌گذارد. دانه‌بندی یکی از مؤلفه های تأثیرگذار بر خواص مارشال آسفالت‌های مخلوط گرم است، بنابراین باید بهترین دانه بندی سنگدانه‌ها را انتخاب کرد. بهترین دانه بندی با بسته بندی مناسب ذرات ریز بین ذرات درشت‌تر مشخص می‌شود که فضای خالی بین ذرات را کاهش می دهد (Zulkati et al, 2012). در حال حاضر، استفاده واقعی از کائولن بسیار محدود است و به عنوان یک فیلر جایگزین در ساخت و ساز روسازی محلی شناخته نشده است. همچنین، استفاده از گرد و غبار کائولن در مخلوط HMA، به ویژه با دانه‌بندی و درصد دانه‌های مختلف، مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. بنابراین، بر اساس شکاف تحقیقاتی فوق، بررسی با تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی با درصدهای مختلف فیلر معمولی که با کائولن و پایداری، فو، خواص حجمی و عملکرد مارشال جایگزین می‌شود، انجام شد. پارامترهایی مانند حساسیت به رطوبت، شیار شدن با روش مارشال طراحی مخلوط با خواص مهندسی معمولی ارزیابی شده است. بنابراین، این مطالعه از طریق آزمایشات آزمایشگاهی برای ارزیابی خواص مخلوط قیری با استفاده از فیلر کائولن همراه با دانه‌بندی سنگدانه Superpave انجام شد.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- قیر

آزمایش‌های زیادی از جمله وزن مخصوص، شکل‌پذیری، نفوذ، سرعت، نقطه آزاد و نقطه نرم شدن برای توصیف اولیه خواص آسفالت با درجه نفوذ انجام شد. نتایج آزمون در جدول ۱ مورد بحث قرار گرفته است، که معیارهای با الزامات مشخصات را برآورده می‌کند.

۲-۲- مصالح سنگی

سنگدانه‌های درشت (حداقل اندازه سنگدانه ≤۴,۷۵ میلی متر) و سنگدانه‌های ریز سنگ آهک (حداکثر اندازه سنگدانه <۴,۷۵ میلی متر) به ترتیب استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-فیلر معدنی

تأثیر فیلر بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالت گرم استثنایی است. زیرا یکی از اجزای مهم در مخلوط HMA است. پرکننده‌ها، به‌عنوان یکی از اجزای یک مخلوط HMA، نقش مهمی در تصمیم‌گیری درباره عملکرد و خواص مخلوط‌های HMA، به‌ویژه تأثیرات به هم پیوسته و اتصال آن دارند. در این تحقیق از پودر خرد شده سنگ و کائولن که از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند به عنوان فیلر معدنی در تهیه مخلوط HMA استفاده شد. خواص فیزیکی، که انتظار می رود در تأثیرگذاری بر ویژگی مخلوط HMA مانند شاخص پلاستیسیته و وزن مخصوص باشند، در آزمایشگاه آزمایش شدند. در این مطالعه از پودر سنگ خرد شده و کائولن به عنوان مواد فیلر استفاده شد که وزن مخصوص ظاهری آنها به ترتیب ۲/۶۷ و ۲/۶۲ است و هر دو فیلر ۱۰۰ درصد از الک شماره ۲۰۰ عبور کردند. خواص فیزیکی سنگدانه سنگ خرد شده (CSD) و کائولن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات قیر

خصوصیات	استاندارد	نتایج	الزامات آیین نامه
نقطه نرمی	ASTM D36	۵۱,٤	٥٦-٤٦
شکل پذیری در ۱۰ درجه	ASTM D113	۹٦,۳۳	حداقل ۵۰
درجه نفوذ	ASTM D5	٦۳,۱	۷۰-٦۰
درجه اشتعال	–	۳۵۳,۵	حداقل ۲۳۲
وزن مخصوص		۱,۰٤	–

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های شکسته شده و کائولن

خصوصیت فیزیکی	پودر سنگ	کائولن
شاخص پلاستیک	غیرپلاستیک	غیرپلاستیک
وزن مخصوص ظاهری	۲,٦٦٨	۲,٦١٩

۳-۲- خواص شیمیایی کائولن

ترکیب شیمیایی انجام شده بر روی کائولن در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده وجود ترکیب اکسیدی مهم و مناسب برای جایگزینی است. ترکیب درصد ترکیبی$Al2O3$، $SiO2$ و $Fe2O3$ بیش از ۷۰ درصد بود. این برای برآوردن الزامات استاندارد ASTM C618 برای مواد پوزولانی برای استفاده به عنوان فیلر کافی بود.

۳-۳- خواص فیزیکی مصالح

آزمایش کیفیت مواد برای نیاز طراحی آسفالت مخلوط داغ بسیار مهم است. نتایج آزمایش خواص فیزیکی یک سنگدانه باید حداقل الزامات آیین‌نامه را برآورده کند. مشخصات فیزیکی دقیق سنگدانه مورد استفاده در جدول ٤ نشان داده شده است.

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی کائولن

ترکیبات شیمیایی	نتایج
SiO_2	٦٣
Al_2O_3	٢٤.١
Fe_2O_3	٢.٨٤
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	٨٩.٩٤
MgO	٠.٠٣
CaO	١.٠٥
Na_2O	٠.٠٣
K_2O	٠.٠٦
TiO_2	٠.٤٧
MnO	٠.٠٣
Total	٩٠.٦١
LoI	٩.٧

جدول ٤. مشخصات مصالح

خصوصیت	نتایج
وزن مخصوص ظاهری	۲,٦٤٩
اشباع با سطح خشک	۲,٦٦
وزن مخصوص واقعی	۲,٦٨
آب جذب شده	۰,٤۲۷
ارزش تاثیر مصالح	۸,۰٦
شاخص ورقه‌ای شدن	۲۹,۹
ارزش شکستگی مصالح	۱۷,۵۵
سایش لس آنجلس	۱۱

۳-٤- خواص فیزیکی سنگدانه‌های معدنی

سنگدانه‌های معدنی مورد استفاده در این تحقیق، غیرمتعارف (کائولن و فیلر معمولی (CSD) می‌باشد. آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین مناسب بودن آنها از طریق آزمایش‌هایی مانند پارامترهای دانه بندی، شاخص پلاستیسیته و وزن مخصوص ظاهری انجام شده است. خواص فیزیکی پودر سنگ خرد شده به طور کلی غیرپلاستیکی است. جدول ۵ خواص فیزیکی هر نوع فیلر را بر اساس ASTMD-۸۵٤ با استفاده از روش پیکنومتر آب نشان می‌دهد. توزیع اندازه ذرات فاکتورهای حیاتی در ارزیابی کائولن برای کاربردهای HMA هستند. بنابراین، توزیع اندازه ذرات نشان می‌دهد که کائولن از نظر کسری اندازه رس (۵۵٪ ۲ >میکرومتر) غنی است، در حالی که سیلت و ماسه کمتر فراوان هستند.

جدول ۵. نسبت‌های ترکیب مصالح

درصد فیلر	بین ۱	بین ۲	بین ۳	مجموع
۵	۲٤	۳۰	٤٦	۱۰۰
٦	۲٦	۲٦	٤۸	۱۰۰
۷	۲۲	۳۲	٤٦	۱۰۰

۳-۵-ترکیب و دانه بندی مصالح سنگی در طرح اختلاط

اختلاط سنگدانه‌ها و دانه‌بندی مهمترین پارامترها در تهیه مخلوط آسفالت گرم می‌باشد. برای تهیه طرح مخلوط مارشال از دانه‌بندی Superpave استفاده شد. دانه بندی سنگدانه‌های Superpave با ادغام مناطق محدود و نقاط کنترلی تنظیم شده است، با دانه‌بندی سنگدانه‌های معمولی متفاوت است. در این مطالعه، سه دانه بندی زیر منطقه محدود [٤](BRZ) انتخاب شد زیرا توزیع ذرات که از زیر منطقه محدود عبور می‌کند، به طور معمول مؤثرترین ماده را برای جاده‌های حمل بار سنگین و برای مکان‌های شدید توسط فراهم می‌کند. علاوه بر این، دانه بندی زیر ناحیه محدود شده دارای مقاومت بهتری است که توسط اسکلت سنگدانه درشت‌تر ارائه می‌شود. برای این مطالعه، سه ترکیب آزمایشی با نسبت‌های مختلف فیلر به کار گرفته شد. سنگدانه‌های موجود یا مواد مورد استفاده، سنگدانه درشت (۹-۲۵ میلی‌متر)، سنگدانه میانی (٤،۷۵-۹ میلی‌متر)، سنگدانه ٤.۷۵-۰) میلی‌متر) و فیلر به منظور تعیین دانه بندی مناسب در داخل ترکیب شدند. محدودیت‌های مجاز با توجه به مشخصات ASTM با استفاده از روش آزمایشی ریاضی. درصد نسبت هر اندازه سنگدانه‌ها باید تعیین و با محدودیت‌های مشخصات مقایسه شود. جدول ٦ نوع مخلوط و نسبت‌های اختلاط اندازه‌های مختلف سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد تا دانه‌بندی ترکیبی مورد نظر را برای محتویات فیلرهای مختلف رشته قیر ایجاد کند. به طور معمول، در این تحقیق، دانه‌بندی عبور از زیر یک منطقه محدود یا دانه‌بندی نسبتاً درشت با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر طبق توصیه‌شده توسط مؤسسه آسفالت انتخاب شد. نسبت اختلاط سنگدانه‌های پذیرفته شده از سه دانه‌بندی در جدول ٦ ارائه شده است. دانه بندی سنگدانه‌های ترکیبی به عنوان BRZ5، BRZ6، و BRZ7 تعیین می‌شوند که در زیر منطقه محدود دانه بندی سنگدانه‌های Superpave با نسبت های ۵، ٦ و ۷ درصد فیلر را توصیف می‌کنند.

جدول ٦. دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک (میلی‌متر)	۲۵	۱۹	۱۲،۵	۹،۵	٤،۷۵	۲،۳٦	۱،۱۸	۰،٦	۰،۳	۰،۰۷۵
درصد عبوری برای فیلر ۵٪	۱۰۰	۹۲،۵	۸۰	٦۹	۵۱	۳۳	۲۰	۷-۱٤	۱۱	۵
درصد عبوری برای فیلر ٦٪	۱۰۰	۹۲	۸۱،۵	۷۲	۵۲،۵	۳۲	۲۱	۱۵	۱۲	٦
درصد عبوری برای فیلر ۷٪	۱۰۰	۹۳	۸۱	۷۰	۵۲	۳۰،۵	۲۰	۱٤	۱۱،۵	۷

جدول بالا نسبت نهایی هر یک از مصالح سنگدانه در مخلوط اسفالتی را نشان می‌دهد و اختلاط دانه بندی سنگدانه پیشنهادی نیاز دانه‌بندی سنگدانه‌های Superpave را برآورده کرده است. با استفاده از این دانه بندی‌ها، مخلوط آسفالتی با استفاده از روش طراحی مخلوط مارشال تهیه و ارزیابی می شود.

۳-٦- نتایج تست های مارشال

برای تعیین میزان بهینه قیر و ارزیابی پایداری مخلوط‌ها در آزمایشگاه از روش طراحی مخلوط مارشال استفاده شد. آزمایش مارشال یک نمونه تهیه شده با مقادیر مختلف فیلر معمولی در ۵، ٦ و ۷ درصد پودر سنگ خرد شده به عنوان فیلر بر حسب وزن سنگدانه با درصدهای قیر متفاوت (٤، ٤,۵، ۵، ۵,۵ و ٦ درصد). جدول ۷ خواص مخلوط را در درصدهای قیر مختلف برای مخلوط‌هایی با در فیلر معمولی متفاوت (CSD) نشان می‌دهد. نتیجه می‌گیرد که در ۵٪ فیلر، پایداری از فیلر ٦٪ و ۷٪ بیشتر است. همچنین، جریان در فیلر ۵ درصد تقریباً در مشخصات لازم یافت می‌شود. این امکان را فراهم می‌کند که دانه بندی با ۵٪ نسبت به دانه بندی دیگر مطلوب باشد.

۳-۷-اثر جایگزینی جزئی کائولن برHMA

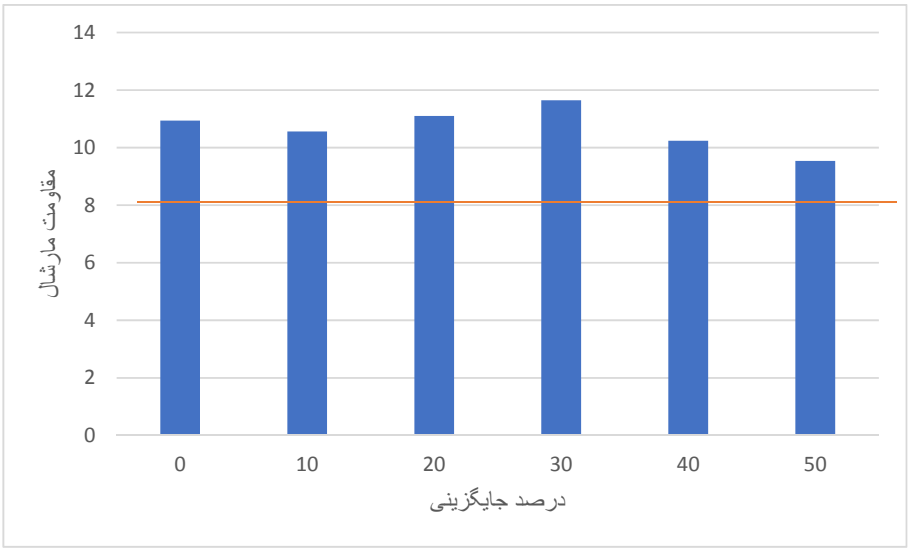
اثر کائولن بر روی مخلوط **HMA** با استفاده از طرح اختلاط مارشال و پارامترهای اندازه‌گیری عملکرد ارزیابی می‌شود. بسته به درصد بهینه قیر انتخابی و دانه‌بندی طراحی با ۵٪ درصد فیلر بهینه، فیلر پودر سنگ تا حدی با فیلر کائولن با پنج نسبت متفاوت با نرخ جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤۰ و ۵۰٪ جایگزین شد. بر اساس جرم کل درصدهای فیلر معمولی همانطور که در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۷. نتایج آزمایش مارشال

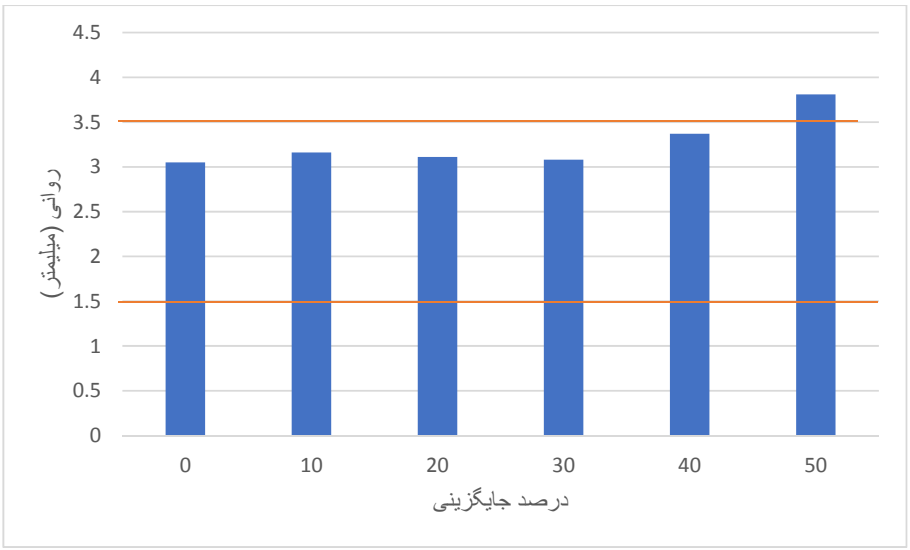
خصوصیات مخلوط	۵	٦	۷
OBC	۵.۱	۵.۳	۵.۵
VFA (%)	۷۱.۵	۷۲	۷۲.۵
VMA(%)	۱٤	۱٤.۸	۱٤.۵
Stability (kN)	۱۱.۲	۱۰.۵	۹.۹
Flow (mm)	۳	۳.٤	۳.۲۵
Bulk density (g/m3)	۲.۳۲	۲.۳۱	۲.۳۱
VIM	٤	٤	٤

جدول ۸ نتایج مارشال برای درصدهای جایگزینی مختلف کائولن

درصد جایگزینی کائولن	GSB[5]	VIM[6]	VMA[7]	VFA[8]	Stability	Flow
۰	۲.۳۲	٤.۱	۱۳.۹۱	۷۰.۵٤	۱۰.۹٤	۳.۰۵
۱۰	۲.۳۱۵	٤.۲۹	۱٤.۵۳	۷۰.۵	۱۰.۵٦	۳.۱٦
۲۰	۲.۳۱۷	٤.۲٤	۱٤.۹	۷۱.۵۵	۱۱.۱	۳.۱۱
۳۰	۲.۳۱۹	٤.۱٦	۱۵.۲۸	۷۲.۷۱	۱۱.٦۵	۳.۰۸
٤۰	۲.۳۱۳	٤.۳۵	۱۵.۹۷	۷۲.۷۱	۱۰.۲٤	۳.۳۷
۵۰	۲.۳۱۳	٤.۵٤	۱٦.۰۳	۷۱.٦۵	۹.۵٤	۳.۸۱



شکل ۱. ارتباط بین مقاومت مارشال و جایگزینی کائولن



شکل ۲. ارتباط بین روانی و درصد جایگزینی کائولن

۳-۷-۱-تأثیر جایگزینی جزئی کائولن بر پایداری مارشال

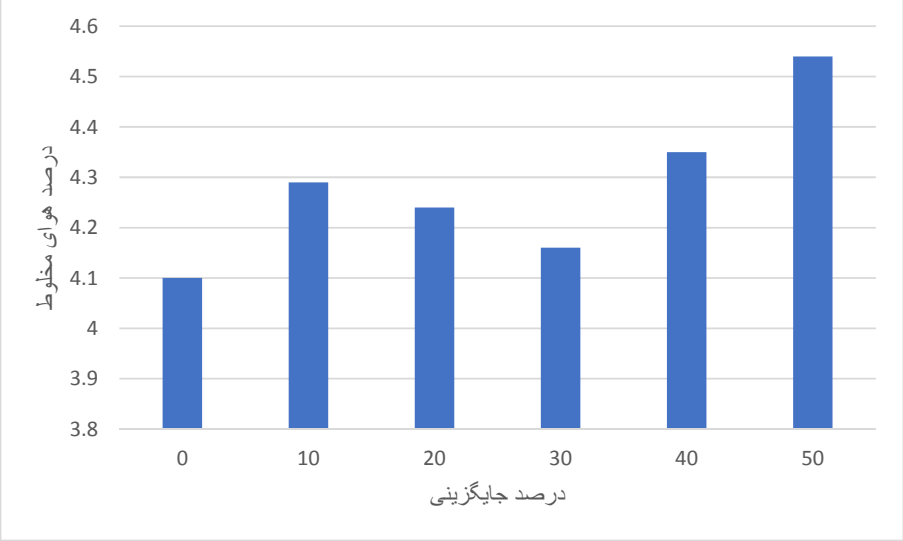
پایداری مارشال یک نمونه آزمایش حداکثر بار مورد نیاز برای ایجاد خرابی زمانی است که نمونه از قبل تا دمای تعیین شده در یک سر آزمایش ویژه گرم می‌شود و بار در یک کرنش ثابت اعمال می‌شود. بنابراین، اثر کائولن بر روی پایداری در شکل ۱ با نسبت‌های متفاوتی از محتویات فیلر معمولی و غیر متعارف نشان داده شده است که مشخصات مورد نیاز را برآورده کرده‌اند. با این حال، پایداری مارشال آن در ۱۰٪ جایگزینی کاهش می‌یابد و در ۲۰٪ و ۳۰٪ جایگزینی کائولن شروع به افزایش می‌کند. همچنین در ٤۰٪ و ۵۰٪ شروع به کاهش می‌کند. بر اساس جایگزینی حاصل از CSD با کائولن، افزایشی در ۲۰٪ و ۳۰٪ نشان داده است. اگر چه درصدهای دیگر جایگزینی کمتر از ترکیب کنترلی است. بنابراین جایگزینی کائولن به میزان ۳۰ درصد تأثیر بسزایی بر روی مخلوط دارد.

۳-۷-۲-اثر جایگزینی جزئی کائولن بر روانی مارشال

تغییر شکل عمودی نمونه در نقطه شکست است. این به وضوح در شکل ۲ نشان داده شده است و مقادیر مارشال فوو به دست آمده از مخلوط‌های آماده شده در آزمایشگاه با استفاده از تمام درصدهای کائولن با معیارهای مارشال (۲,۰ میلی‌متر تا ۳,۵ میلی‌متر) به جز ۵۰٪ جایگزینی مطابقت دارد. برای مخلوط‌هایی که با استفاده از ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از نرخ جایگزینی کائولن تهیه شده‌اند، مقادیر روانی به دست آمده نسبتاً یکسان است .مقادیر بالاتری از مرغ نیز برای مخلوط های تهیه شده با استفاده از نرخ جایگزینی کائولن ٤٠ درصد به دست آمد.

۳-۷-۳- اثر جایگزینی جزئی کائولن بر فضای خالی مخلوط

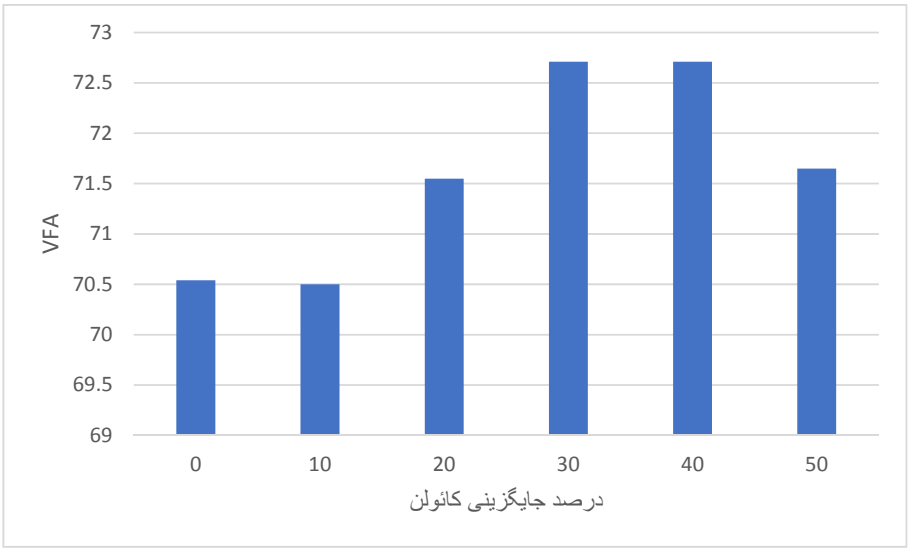
فضاهای خالی در کل مخلوط به حجم کل حفره‌های کوچک هوا بین ذرات سنگدانه پوشش داده شده در سراسر یک مخلوط سنگفرش فشرده اشاره دارد. بر اساس شکل ۳، هر ترکیب از یک الگوی کلی پیروی نمی کند. با توجه به نتایج آزمایش، تمام مخلوط‌های HMA تهیه‌شده با جایگزینی نسبی توسط فیلر کائولن محتوای فضای خالی هوا را در محدوده ۳ تا ۵ درصد همچنین مؤسسه آسفالت ارائه کردند. شکل ۳ نشان می‌دهد که در ۳۰٪ درصد فیلر کائولن، درصد فضای خالی هوا ٤,١٦٪ بود که کمترین فضای خالی هوا و نزدیکترین مقدار فضای خالی هوا ٤,١٠٪ از مخلوط کنترل است. بنابراین، جایگزینی در ۳۰٪ نتیجه بهتری را در مقایسه با سایر درصدهای مخلوط ارائه می‌دهد.



شکل ۳. رابطه درصد هوای مخلوط با جایگزینی فیلر

۳-۷-٤- اثر جایگزینی جزئی کائولن بر فضای خالی پر شده با آسفالت(VFA)

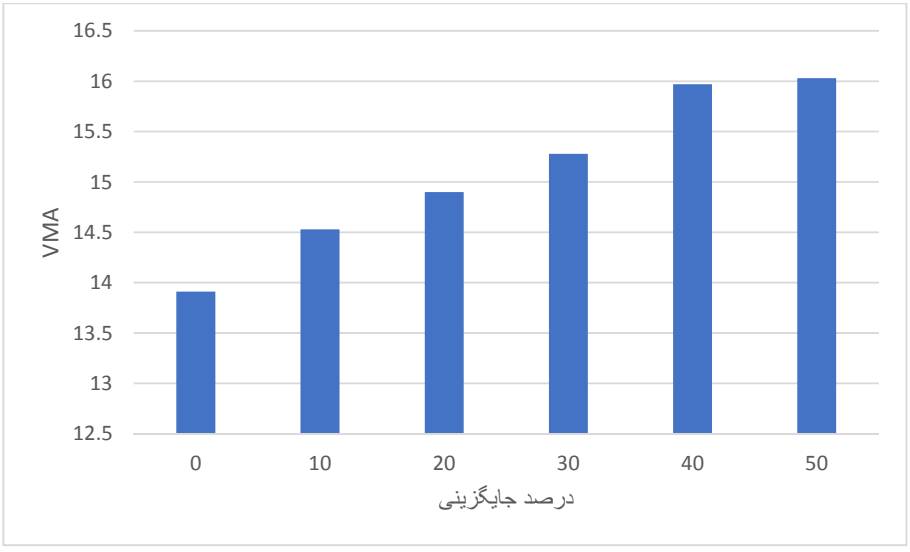
فضای خالی پر شده با آسفالت به عنوان نسبت VMAهایی که با قیر اشغال شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. اثر درصدهای جایگزینی مختلف کائولن بر روی حفره‌های پر شده با خواص آسفالتی مخلوط در شکل ٤ نشان داده شده است VFA . در کل مخلوط افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج تجربی، مقادیر VFAبا افزایش نرخ جایگزینی فیلر کائولن تا رسیدن به نرخ جایگزینی ٤٠ درصد افزایش می‌یابد. سپس با رسیدن به نرخ تعویض ۵۰ درصد شروع به کاهش می‌کند. مقادیر VFA در مخلوط‌های آسفالتی با مخلوط گرم در محدوده ٦۵٪ تا ۷۵٪ است. همانطور که در شکل ٤ نشان داده شده است، تمام مخلوط‌های کائولن همراه با دانه بندی Superpave این نیاز را برآورده می‌کنند.



شکل ٤. رابطه جایگزینی فیلر و VFA

۳-۷-۵- اثر جایگزینی جزئی کائولن بر فضای خالی در سنگدانه‌های معدنی(VMA)

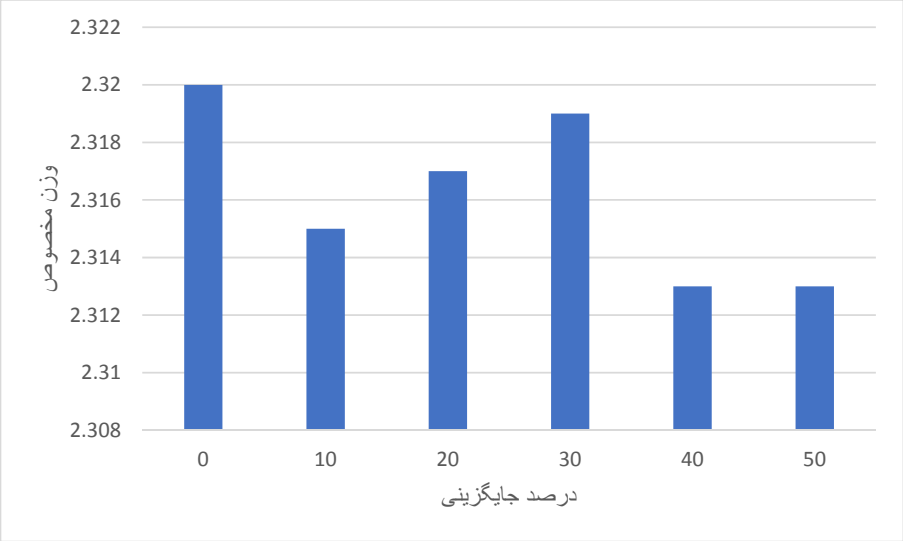
فضای خالی در سنگدانه‌های معدنی، حجم فضای خالی بین دانه‌ای بین ذرات سنگدانه یک مخلوط روسازی متراکم است. اثرات درصدهای مختلف فیلر کائولن بر روی VMA مخلوط روسازی قیری در شکل ۵ نشان داده شده است. الگوی کلی شکل به این صورت است که با افزایش نرخ جایگزینی کائول ، VMAمخلوط روسازی نیز افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مقادیر VMA با افزایش نرخ جایگزینی فیلر کائولن افزایش می‌یابد. نشان داده شده است که VMA تمام مخلوط‌های آسفالتی مخلوط گرم در محدوده مجاز است.



شکل ۵. رابطه بین درصد جایگزینی کائولن و VMA

۳-۷-٦- اثر جایگزینی جزئی کائولن بر چگالی ظاهری

وزن واحد مخلوط به طور قابل توجهی تحت تأثیر مقدار کائولن قرار نمی‌گیرد. وزن واحد هر مخلوط با نرخ جایگزینی متفاوت کائولن در محدوده مورد نیاز است. شکل ٦ نشان می‌دهد که چگالی ظاهری با افزایش کائولن افزایش می‌یابد تا زمانی که به ۳۰ درصد محتوای فیلر کائولن می‌رسد. با افزایش نرخ جایگزینی، چگالی ظاهری شروع به کاهش می‌کند بر اساس نتایج بررسی، نرخ جایگزینی ۳۰ درصد کائولن در مقایسه با سایر نرخ‌های جایگزینی، چگالی ظاهری بیشتری را ارائه می‌کند. انتظار می‌رود با افزایش نسبت (درصد) مقدار کائولن در مخلوط تا ۳۰ درصد، چگالی ظاهری افزایش یافته و سپس کاهش یابد. دلیل این امر این است که افزایش مقدار کائولن باعث افزایش مقدار ریزدانه در مخلوط می‌شود و مقدار زیادی از ذرات ریز تمایل دارند ذرات بزرگتر را از هم جدا کنند و به عنوان روان کننده بین این ذرات بزرگتر عمل کنند که متعاقباً حجم را کاهش می‌دهد.

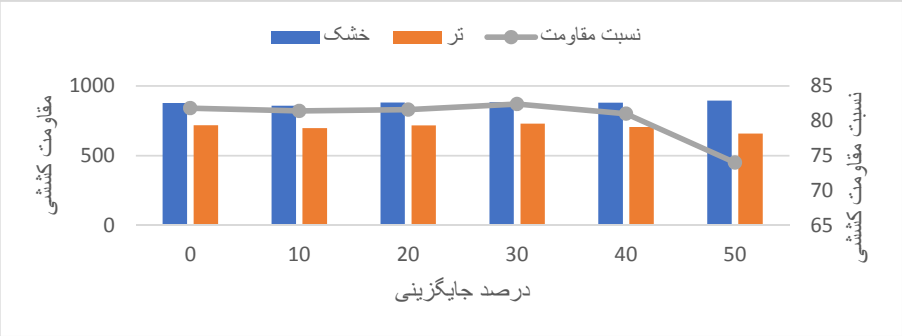


شکل ٦. رابطه وزن مخصوص و جایگزینی کائولن

۳-۸- تأثیر جایگزینی جزئی کائولن بر حساسیت به رطوبت

۳-۸-۱-نتایج آزمون نسبت مقاومت کششی

استحکام کششی غیرمستقیم نمونه‌های بدون شرط و شرطی شده برای این مطالعه تعیین شد. مقدار TSR به عنوان درصد نسبت مقادیر شرطی به غیر شرطی بیان می‌شود. اثرات درصدهای مختلف فیلر کائولن بر حساسیت رطوبت مخلوط روسازی قیری در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، نسبت استحکام کششی با افزایش کائولن افزایش می‌یابد تا زمانی که به ۳۰٪ از برسد. درصد فیلر کائولن ده، با افزایش نرخ جایگزینی، TSR شروع به کاهش می‌کند. بر اساس راهنمای طراحی روسازی انجمن مقامات بزرگراه و حمل و نقل ایالتی آمریکا، مقدار TSR در مخلوط آسفالت گرم حداقل ۸۰ درصد است. همانطور که در جدول ۱۰ نشان داده شده است، همه مخلوطها با کائولن همراه با دانه بندی Superpaveبه جز نرخ جایگزینی ۵۰ درصد، نیاز را برآورده کردند. بر اساس نتایج بررسی، نرخ جایگزینی ۳۰ درصد کائولن در مقایسه با سایر نرخ‌های جایگزینی، حساسیت بیشتری به رطوبت ایجاد می‌کند. این بررسی نشان می‌دهد که مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش محتوای کائولن کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش مقدار فیلر کائولن، اینترلاک کمتر و اصطکاک داخلی بین ذرات سنگدانه که منجر به مخلوط می‌شوند مقاومت داخلی ضعیفی در برابر بارهای خارجی داشت.



شکل ۷. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم

۳-۹- انتخاب درصد فیلر کائولن بهینه

مخلوط کنترل با ۰ درصد کائولن به عنوان کنترل برای تعیین نسبت بهینه فیلر معرفی شد. خواص مارشال و حساسیت به رطوبت برای یافتن محتوای بهینه فیلر که مخلوط HMA را با بهترین عملکرد تولید می‌کند استفاده می‌شود. مخلوط آسفالتی با محتوای فیلر بهینه شرایط زیر را برآورده می‌کند: حداکثر پایداری، حداکثر چگالی ظاهری، فضای خالی هوا و نسبت استحکام کششی در محدوده مجاز مشخصات هستند. جدول ۸ مقادیر پایداری همه مخلوط‌های HMA را برای درصدهای مختلف درصد فیلر کائولن نشان می‌دهد که هم با مشخصات محلی و هم بین‌المللی مطابقت دارد. با این حال، حداکثر مقدار پایداری از مخلوط مربوط به ۳۰٪ فیلر کائولن نسبت به سایر نسبت‌ها پیدا شد .همچنین، نتیجه متناظر مقادیر فضای خالی و چگالی ظاهری به ترتیب ٤,١٦٪ و ۲,۳۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که تقریباً با مخلوط کنترل یکسان است. حساسیت به رطوبت ۳۰ درصد کائولن که ۸۲,۳۸ درصد است، بزرگترین نتیجه به دست آمده از هر مخلوط است. این نشان می دهد که کائولن با این درصد حساسیت به رطوبت مخلوط را با ۱۰۰ ٪ CSD بهبود می‌بخشد. از این رو، جایگزینی گرد و غبار سنگ خرد شده به میزان ۳۰ درصد کائولن نتیجه بهتری نسبت به نرخ مخلوط دیگر دارد. جدول ۹ نشان می‌دهد که مخلوط HMA تهیه شده با جایگزینی نسبی فیلر کائولن با نرخ جایگزینی ۳۰٪ مخلوط شده با منطقه‌ای با دانه بندی سوپرپیو کمتر از حد محدود، الزامات محدودیت‌های مشخصات محلی و بین‌المللی را برای تمام پارامترهای آسفالت مخلوط گرم آزمایش شده برآورده می‌کند. پایداری و حساسیت به رطوبت مخلوط کنترل با جایگزینی ۳۰ درصد کائولن با وزن غبار سنگ خرد شده بهبود می‌یابد. با این حال، نرخ جایگزینی دیگر مشخصات مورد نیاز را برآورده کرد. بر اساس این مطالعه ۳۰ درصد از محتوای کائولن به عنوان بهترین نسبت جایگزینی مواد فیلر انتخاب شده است.

جدول ۹. مقایسه درصد بهینه کائولن با نمونه‌ها

پارامترها	شاهد	جایگزینی٪۳۰
مقاومت مارشال	۱۱	۱۱.٦۲
وزن مخصوص	۲.۳۲	۲.۳۲
VIM	٤.۱	٤.۱۷
VFA	۷۰.۵۵	۷۲.۷۳
VMA	۱۳.۹۲	۱۵.۳
Flow	۳.۰٤	۳.۰۹
TSR	۸۱.۷٦	۸۲.۳۷

٤-نتیجه گیری

خواص فیزیکی و شیمیایی کائولن مورد بررسی قرار گرفت و برای جایگزینی به عنوان فیلر مناسب یافت شد. گرانش ویژه، شاخص پلاستیک، و توزیع اندازه ذرات کائولن نیاز مشخص شده در مشخصات را برآورده می‌کند. علاوه بر این، کائولن حداقل نیاز مواد پوزولان طبیعی را برای استفاده به عنوان یک ماده افزودنی معدنی مشخص شده توسط ASTM با درصد ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) ۸۹.۹٤ درصد برآورده می‌کند که رضایت‌بخش است. مواد فیلر در آسفالت مخلوط داغ تمام خواص مخلوط مارشال برای همه مخلوط‌ها از نسبت فیلرهای مختلف در ۵٪، ٦٪ و ۷٪ با سه ناحیه مختلف زیر محدود از دانه‌بندی Superpave، هم مشخصات محلی و هم بین‌المللی را برآورده می‌کند.

-هنگامی که محتوای فیلر CSD افزایش می‌یابد، OBC افزایش می‌یابد. این به این دلیل است که وقتی محتوای فیلر بیشتر می‌شود، سطح کلی سنگدانه و نرخ جذب فیلر افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که برای برآوردن الزامات دارایی مارشال، محتوای قیر بالاتری مورد نیاز است.

-پایداری مارشال تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد، جایگزینی کائولن سپس شروع به کاهش می‌کند. افزایش پایداری ممکن است ناشی از کائولن باشد که دارای تخلخل و مساحت سطح ویژه بالاتری است. از این رو، ادغام این فیلرها سفت شدن بیشتری را در ماستیک ایجاد کرد که به نوبه خود مخلوط‌هایی با مارشال بالاتر ایجاد کرد. (**V**) مقدار استحکام کششی غیرمستقیم تا ۳۰ درصد نرخ جایگزینی افزایش یافت. این نتیجه به دلیل کائولن از مواد فیلر است که دارای تخلخل بالاتری است و سطح ساختار سلولی تمایل به توزیع یکنواخت در طرح مخلوط دارد که چسبندگی آسفالت به سنگدانه را افزایش می‌دهد.

-در ۵۰٪ مخلوط کائولن مقاومت رطوبتی کمتری نسبت به مشخصات دارد. این ممکن است به دلیل افزایش شدید مقدار سیلیس و آهن باشد، حساسیت به رطوبت در مخلوط آسفالتی را کاهش می دهد و پیوند آسفالت-دانه‌ها را در حضور آب تخریب می‌کند. عمق روت کائولن بهینه بیشتر از CSD است. این ممکن است به دلیل ظرافت کائولن بیشتر از فیلرها باشد. فیلرهای ریزتر تمایل به توزیع یکنواخت در مخلوط‌های آسفالتی دارند که سفتی کلی آسفالت را افزایش می‌دهد.

-عمق روت کائولن بهینه بیشتر از CSD است این ممکن است به دلیل ظرافت کائولن بیشتر از فیلرها باشد. فیلرهای ریزتر تمایل به توزیع یکنواخت در مخلوط‌های آسفالتی دارند که سفتی کلی آسفالت را افزایش می‌دهد.

-بر اساس پارامترهای مارشال و نتایج حساسیت به رطوبت، نسبت جایگزینی بهینه در ۳۰ درصد کائولن و ۷۰ درصد از CSDمحتوای فیلر بود که دارای حداکثر چگالی ظاهری، حداکثر پایداری است.

-رفتار شیارشدگی کلی مخلوط تهیه شده با کائولن ۳۰ درصد تقریباً مشابه مخلوط تهیه شده با مخلوط شاهد بود. هر دو مخلوط مطابق با مشخصات مورد نیاز را برآورده می‌کنند. این ثابت می‌کند که استفاده از کائولن به عنوان فیلر جایگزین در محتوای بهینه در مخلوط آسفالتی عملکرد بهتری را به عنوان مخلوطی با فیلر ۱۰۰٪ CSD ارائه می‌دهد. از این مطالعه، نتایج آزمایش به دست آمده از مخلوط با کائولن روند نسبتاً مشابهی با استفاده از فیلرهای سنگ خرد شده دارد و این به ما نشان می‌دهد که فیلرهای کائولن را می‌توان به عنوان یک نوع فیلر جایگزین در مخلوط‌های قیری برای خرد شده استفاده کرد.

٦-پی‌نوشت‌ها

1- Hot Mix Asphalt
2- Cruched Stone Dust
3- Optimum Bitumen Content
4- Below Restrict Zone
5- Specific Gravity
6- Void In Mixture
7- Voids In Mineral Aggregate
8- voids filled with asphalt

۷-مراجع

-Bedassa. G., W. Getaneh, and B. Hailu (2019). Geochemical and mineralogical evidence for the supergene origin of kaolin deposits – corigin of kaolin deposits – central Main Ethiopian rift. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 149, 143–153.

-Brown. E. R. and R. B. Mallick (2012). Stone matrix asphalt -properties related to mixture design. NCAT Report 94-2, *National Center for Asphalt, Auburn,* Alabma, USA, 1–15,

-Guha. A. H. and G. J. Assaf (2020). Efect of Portland cement as a fller in hot-mix asphalt in hot regions. *Journal of Building Engineering*, Vol. 28, Article ID 101036.

-Kim. K., S. Haeng Jo, N. Kim, and H. Kim (2018). Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage aggregate according to temperature and void percentage. *Construction and Building Materials*, Vol. 188, 1128–1136.

-Khasawneh. M. A. and M. A. Alsheyab (2020). Efect of nominal maximum aggregate size and aggregate gradation on the surface frictional properties of hot mix asphalt mixturessize and aggregate gradation on the surface frictional properties of hot mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 244, Article ID 118355.

-Lee. S., S. Mun, and Y. Richard Kim (2011). Fatigue and rutting performance of lime-modifed hot-mix asphalt mixtur- esasphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 11. 4202–4209.

-Mampearachchi. W., P. K. Fernando, and P. R. D. Fernando (2012). Evaluation of the efect of Superpave aggregate gradations -on Marshall mix design parameters of wearing coursegradations on Marshall mix design parameters of wearing course," *J.Natn.Sci.Foundation Sri Lanka*, Vol. 40, No. 3, 183–194.

-Mohd Satar. M. K. I., R. P. Jaya, M. H. Rafsanjani et al., (2017). Performance of kaolin clay on hot-mix asphalt properties. in *Proceedings of the International Post Graduate Conference on Applied Science & Physics*, Qingdao, China, July.

-Pourtahmasb. M. S. and M. R. Karim (2014). Utilization of recycled concrete aggregates in stone molecular simulation of hy- drogen storage in ion-exchanged X zeolites. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, Article ID 189745, 1-10.

-Singh. P. Rajput and R. K. Yadav (2016). Use of plastic waste in bituminous road construction. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, Vol. 2, No. 10.

-Zulkati. A., W. Y. Diew, and D. S. Delai (2012). Effects of fillers on properties of asphalt -concrete mixture. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No. 7, 902–910.

Laboratory Evaluation of the Performance of Hot Mix Asphalt Made with Kaolin as a Filler with the Superpave Aggregates Gradation

Sara Choubdar, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: sara_choubdar@civileng.iust.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

Mineral fillers and different granulations of aggregates have a great effect on the mechanical properties of asphalt pavements. In this research, the effect of non-conventional materials called kaolin and superpave granulation on Marshall properties, moisture sensitivity and permanent deformation in asphalt mixtures was investigated. The chemical composition of kaolin shows that the total amount of silicon dioxide (SiO2), iron oxide (Fe2O3) and aluminum oxide (Al2O3) was 63, 24.1 and 2.84%, respectively. The physical properties of kaolin were determined on specific gravity and the plastic index was 2.62 and 3.24, respectively. Based on the characteristics of the studied area and temperature, bitumen grade with penetration of 60/70 is selected. Hot mix asphalt 1 (HMA) samples of three different superpave granulations with conventional crushed stone filler (CSD) 2 with different ratios (5.0, 6.0, and 7.0%) and five different bitumen contents (4, 4.5, 5, 5.5 and 6) was prepared. %. Warm mix asphalt with 5.0% CSD was chosen as the control mixture. The conventional filler was replaced with kaolin at different replacement rates (0, 10, 20, 30, 40 and 50%) based on the control mix with 5% CSD and 5.1% optimum bitumen content (OBC)3. A replacement rate of 30% kaolin provides Marshall properties and better resistance to moisture sensitivity. The results of the tests showed that the use of kaolin on HMA met the criteria set in the specification as a filler with superpave gradation up to 30% of the replacement of conventional filler in HMA.

Keywords: Kaolin, Filler, Moisture Sensitivity, Performance, Superpave, Modified Bitumen